3

4章

放射性物質とX線の安全な取り扱い方

新人研究者・技術者のための
安全のてびき

事故例から学ぶ 1

◆東海村 JCO 臨界事故

1999 年 9 月 30 日，午前 10 時 35 分ごろ，茨城県那珂郡東海村の株式会社ジェーシーオー（以下 JCO）の東海事業所内に設置されている転換試験棟で，3 人の作業員が硝酸ウラニルを製造中，突然の青い閃光とともにガンマ線モニターが警報を発し，臨界事故が発生した．3 人の作業員が多量の中性子線などで被曝し，最終的に 2 人の犠牲者と，防災関係者，敷地内にいた従業員および付近住民などに 667 人の被曝者を出した．わが国の原子力開発史上最悪の惨事であった．

この作業は 1984 年に加工施設として国の許可を得ていた試験棟で，実験用原子炉で使用するウラン濃縮度 18.8％の硝酸ウラニル溶液を製造していた．原子炉等規制法にもとづき，国に提出し，認可された施設条件，加工方法，手順（JCO が国と取り決めた技術標準）にもとづいて製造していた．また保安教育を含む保安規定の認可も得ていた．

ただ，初期に設定された技術標準にもとづく生産では採算性がよくないため，生産現場からの数度の改善提案があり，専門技術者や工場幹部が社内単独で変更を承認した加工方法と手順で生産が行われていた（図 1-13）．手順のそれぞれの変更に際しては上記の技術標準との整合性の確認が行われず，国にも変更届は提出されなかった．

手順の変更点は，溶解塔を使用せずにステンレス製のバケツを使用して，U_3O_8 粉末を硝酸で溶解し，硝酸ウラニル溶液を生産することであった．さらにバケツ 7 杯分を混合して均質化する作業を，作業が容易な沈殿槽を用いて行っていた（図 1-14）．このとき沈殿槽での取扱量が，臨界事故を防ぐために決められていた制限量を大幅に超え，核分裂が連続的に継続される臨界状態となった．

後の調査で判明したところでは，JCO では臨界に関する教育がほとんど行われておらず，末端作業者から幹部まで臨界事故の発生の可能性を意識しないまま長年生産を行っていた．

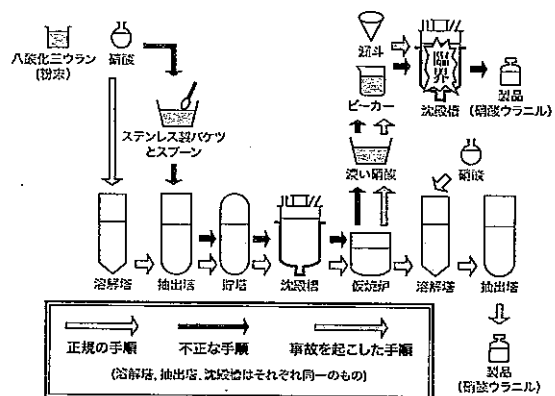



図 1-13　転換試験棟での作業手順

図 1-14　事故時の作業の様子

参考：原子力安全委員会ウラン加工工場臨界事故調査委員会，『ウラン加工工場臨界事故調査委員会報告（案）』（1999 年）など

事故例から学ぶ 4

◆1．東海村核燃料工場臨界事故

国内で起きた初めての臨界事故で，作業者の被曝のみならず，周辺住民100名が被曝した（詳細はp. 14「事故例から学ぶ1」参照）．

◆2．チェルノブイリ原子力発電所爆発事故

1986年4月26日未明，ウクライナ共和国にあるチェルノブイリ原子力発電所（原発）の4号炉で，計画変更等があり，タービン発電機の性能テスト中，原子炉を停止する際に低出力の実験を行った．そのとき原子炉の出力が急上昇し，砕け散った燃料と水との反応で大きな水蒸気爆発事故が起きた．約8000km離れた日本でも，野菜・水・母乳などから放射能が検出された．放射能は大地や水，空気を汚染し，そこで暮らす生物すべてが汚染された．ロシア，ウクライナ，ベラルーシの3国の汚染地域の総面積は145,000km^2，約600万人の住民が汚染された．子どもたちの間で甲状腺がんが急増した．

そのほかの原子力発電所の大事故として，1979年にアメリカのペンシルベニア州のスリーマイル島原子力発電所で原子炉の炉心が融解し，10万人以上の住民が避難した事故がある．

わが国の原子力発電事故には，1995年「もんじゅ」ナトリウム漏れ事件（2010年運転再開），2001年中部電力浜岡1号炉配管水素爆発事故がある．

◆3．放射線源管理の不徹底

大学での事例が多い．医学部，病院などでラジウム226線源が非管理区域に放置されていた．

数例をあげると，慶応大学医学部共同実験室室内の棚，名古屋市立城北病院の非管理区域の倉庫に保管．九大医学部の非管理区域の皮膚科婦長室のキャビネット奥，東京大学医学部付属病院東研究棟．また，徳島大医学部の研究室などには，放射性物質を含んだ廃液が入った瓶など約1100本が放置されていたことがわかった．瓶の表面の放射線量は低く，周囲の汚染もないことから，人体や環境に影響はないという．文部科学省は，大学長に文書で厳重注意した．大学は教授らを処分する方針．

◆4．管理区域外への汚染拡大

2000年に放射線医学総合研究所の画像診断棟内で，短寿命放射線薬剤合成装置の調整作業を行っていた作業員が，手につけた汚染（フッ素18）を管理区域内および区域外（便所，食堂等）に拡大させた．管理区域外への汚染拡大は，汚染検査をせずに管理区域外に退出したことによる．管理区域内のドアノブを介してほかの作業員にも汚染が拡大した．

◆5．X線被曝事故

2001年11月29日，岩手県北上市の県立高校では，17歳男子生徒の指にX線を照射して，指の骨をスクリーン上に投影して見せていた．画像のピントがあまかったため，調整しながら40秒間ほどX線透視をした．19日後，この生徒の右手指の甲部（爪側）中央部3～4cmの範囲に紅斑が生じた．

使用X線装置は，商品名「ソフテックス」で，取扱説明書には人体への使用は厳禁と書かれていた．しかし，説明書は紛失していたので，指導教諭は禁止事項の確認ができなかった．安全装置も取りはずされていた．

〔「健康文化」34号（2002. 10）より〕

4-1 放射性物質とは

放射線はＸ線診断，がん治療などの医療分野，品種改良などの農業分野，厚さ計，高分子の重合促進などの工業分野，文化財年代測定などの学術分野，分子生物学の研究手段など，さまざまな分野で利用されている．

■ 放射線の種類と関連用語 ■

原子の不安定な核（放射性核種）は放射線を出して安定な核種に変わる（壊変）．放射線にはα線，β線，γ線，Ｘ線，中性子線などがある（図4-2）．以下に，放射線関連の基本用語を挙げる．

○放射性同位元素（Radio Isotope：RI）：放射線を出す性質をもった元素．線源となる．表4-1に放射線を出す核種を示した．

○核エネルギー：化学的エネルギーに比べて，桁違いに大きなエネルギーをもっている*1．がん治療の放射線療法は，高エネルギー，物質への高い透過力をもつ性質を利用して，体内のがん組織を損傷致死させる方法である．

○半減期：最初に存在していた原子数の半分が壊変するのに要する時間．

○標識化合物：分子中の一つ以上の原子を放射線核種で置き換えた化合物（例 ^{14}C）．

○アイソトープ（同位体）：原子番号は同じであるが中性子数，すなわち質量数が異なる原子．

■ 放射線の利用法 ■

放射線には，見えない，触れられない，匂わない，聞こえないという特性があることに注意しなければならない．

そして，重大な放射線障害を起こすという特徴があるので，放射性物質の入手から，保管，使用，運搬，そして廃棄まで，厳しく法により規制されており，いつでもどこでも勝手に使うことはできず，法令を遵守しなければならない．

放射線防護については，法律が定められている．基本的なものを定める法律（原子力基本法，放射線障害防止法，労働基準法，労働安全衛生法，医療法，薬事法），法律を施行するための施行令，規則，告示によって規制されている．

放射線業務従事者に関係する法律の概略はp. 51 表4-2にまとめている．

■ RI 装備機器 ■

RI 装備機器類には，ガスクロマトグラフ，厚さ計，レベル計，硫黄計，非破壊検査装置，密度計，たばこ量目計，水分計，静電気除去装置，蛍光Ｘ線分析装置や，医療用として，器具滅菌装置，アフターローデイング装置，血液照射装置，遠隔治療装置などがある．

サイクロトンやシンクロトロンなど法令に定められた10種類の放射線発生装置および専任の主任者が管理して取り扱うものは，専門性が高いので説明を省略する．

なお，放射線安全取り扱いについての詳細は参考文献*2を参照されたい．

＊1　化学反応は主として熱反応であり，簡単に比較できないが，人の半数が死亡する被曝線量は，4(Gy) ＝4(J/kg) である．4(Jkg) /4.1855 (J/cal) ≒1(cal/kg)．大きな線量であっても，放射線から受け取る熱エネルギーはわずかである．

＊2　日本アイソトープ協会『放射線・アイソトープを取扱う前に——教育訓練テキスト』(2005)

閲欄情報：化学同人　新人研究者・技術者のための安全のてびき　ISBN978-4-7598-1435-4

放射性物質を太陽にたとえると,
・放射能＝太陽（光る性質をもつ）
・光＝放射線

「放射能」：放射線を出す性質や能力
単位「ベクレル（Bq）」
「放射線量」：物質に吸収されたエネルギー量
単位「グレイ（Gy）（J/kg）」
体に与える影響の程度：単位「シーベルト（Sv）」

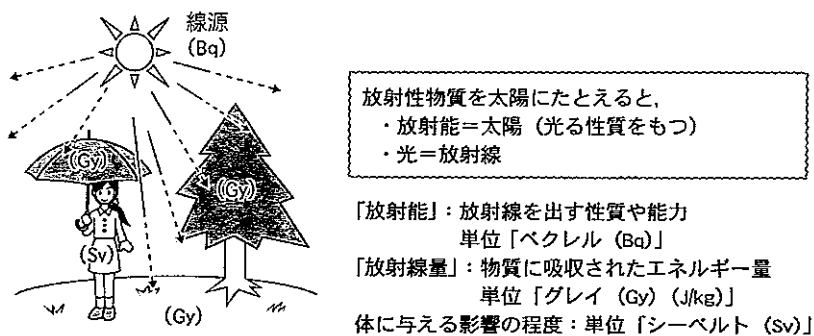



図 4－1　放射能と放射線のたとえ

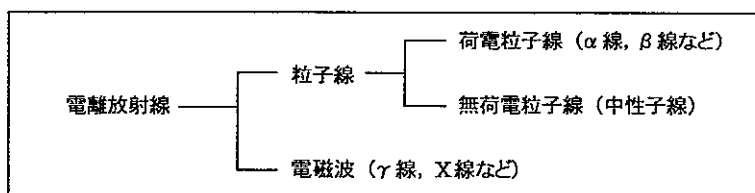



図 4－2　放射線の分類

表 4－1　おもな放射線核種

核種	半減期	おもな放射線エネルギー (MeV)，[　] は線種
^{3}H	12.33 年	[β] 0.0186
^{14}C	5730 年	[β] 0.156
^{32}P	14.26 日	[β] 1.711
^{60}Co	5.27 年	[β] 0.318　[γ] 1.173, 1.333
^{125}I	59.4 日	[γ] 0.0355

Compass

◆ 放射線は五感では感じないが，高エネルギー・高浸透力をもつので注意しよう．
◆ 放射線は．保管，使用，運搬から廃棄まで法規で規定されているので遵守しよう．
◆ R I 装備機器の種類と特性を知り，放射線を正しく使いこなそう．

閲覧情報：化学同人　新人研究者・技術者のための安全のてびき　ISBN978-4-7598-1435-4

4-2 放射性物質の取り扱い方　その1

■ 非密封放射線を取り扱う場合 ■

放射線源には非密封線源と密封線源がある．密封線源とは，放射線障害防止法施行規則によれば以下のような放射線源である（密封線源の取り扱いについては典型例である「X 線」で後述する）．

①正常な使用状態で，開封または破壊されるおそれがない，

②密封された RI が漏洩浸透などにより散逸して汚染するおそれがない．

非密封の放射性物質は，人体や周囲を汚染する危険性があるので慎重に取り扱う（図 4-3）．

◆事前準備

① 実験計画を立て，非放射性物質による予備実験を必ず行う．

② 実験機器，防御用品（作業着，ゴム手袋，サンダル，防護マスク，保護メガネなど），遮蔽用具（ポリエチレンろ紙シート，ペーパータオル，鉛エプロンなど），そして，サーベイメーター*3 などを用意する．

③ 使用する放射性物質の性質（核種，被曝線量，半減期，化学形態に関する物理的・化学的性質など）を精査し，情報を十分把握しておく．

◆留意事項

① 施設ごとに，安全を確保するための放射線予防規程，利用規程および各種規程を定めることが義務づけられている（図 4-4）．

② 作業を行う場合は，「放射線取扱主任者」の監督下で行わねばならない．

③「管理区域内」で使用しなければならない．

④ 管理区域内での被曝線量測定器については，p.56 を参照．

⑤ 線源の入手，譲渡・譲受および保管は，放射線取扱主任者の管理下で行う．

⑥ 廃棄物は勝手に廃棄せず，指定業者に委託する．

■ 放射線防護の 3 原則（3C）■

① 限られた空間内に閉じ込める（Contain）：放射性物質取扱作業室（使用区域，管理区域）で使用する．飛散，ガス化しやすい標識化合物，高ネルギー γ 核種の操作は，フードなどの遮蔽体内で行い，飛散被曝の危険度が高い場合には部屋自体を限定し，人の出入りなども制限する．

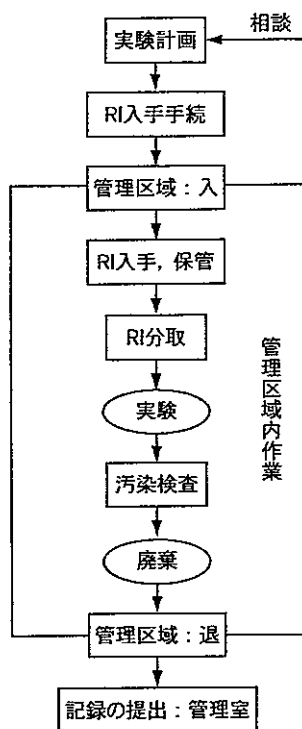
② 必要最少量を用いる（Confine）：余分な RI を購入しない．実験に必要な最少量を分注し，未使用分を密閉容器に入れ保管場所に戻す．

③ 適切に管理できる状態での使用（Control）：作業者以外の放射線管理者が，使用量，保管量，管理区域への入退出，排気・排水などを管理・制御し，事故を予防する．

■ 放射線施設 ■

放射線を扱う管理区域は，使用，貯蔵，廃棄施設からなっており，管理区域には境界を設け，みだりに人を立ち入らせない．それぞれの施設には図 4-5 のような標識をつけ，放射線施設であることを明示する義務がある．

＊3　空間線量率または表面汚染の測定を行う携帯用の放射線測定器．電離箱式，GM 管式，NaI（Tl）シンチレーション式などがある．検出する放射線，感度などが異なるので使用目的に応じた種類を選択すること．

閲欄情報：化学同人　新人研究者・技術者のための安全のてびき　ISBN978-4-7598-1435-4

「記録，管理」
　RIを購入したら，台帳に記入する．
・使用記録：年月日，使用者名，数量，目的，場所

「管理区域」
　放射線障害防止法で定める基準値を超えるおそれのある場所
・管理区域の入退室時には必ず規定に従い必要事項を記入し記録を残す．
・線源は実験中を除き，指定された保管場所に保管管理する．
・管理区域は閉鎖系であるので，火災や地震等の緊急時に備えて，避難経路や通報方法を確認しておくこと．

図4－3　非密封線源使用の流れ
西澤邦秀・飯田孝夫『放射線安全取扱の基礎』（名古屋大学出版会 2006）を参考に作成

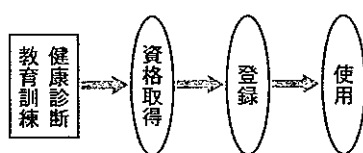
まず，放射線業務従事者（従事者）は使用資格を取得して，登録する．

不明な点は自己流に判断せず，放射線取扱主任者（p.51の表4－2参照）などに必ず相談すること！

図4－4　放射線取扱業務に従事するための手順
西澤邦秀・飯田孝夫『放射線安全取扱の基礎』（名古屋大学出版会 2006）を参考に作成

図4－5　放射線標識

Compass

◆ **予備実験，防御品の用意，物質の物性や量の把握など，事前準備を十分行おう．**
◆ **作業は管理区域内において放射線取扱主任者の監督の下で行おう．**
◆ **閉じ込め，最少量の使用，適切な管理という放射線防護の3原則を守ろう．**

閲覧情報：化学同人　新人研究者・技術者のための安全のてびき　ISBN978-4-7598-1435-4

4-3 放射性物質の取り扱い方　その2

放射性物質取り扱い時の具体的な管理事項について，四つの側面に分け，注意点を挙げる．

■ 環境管理 ■

○ドアの開閉を含め，管理区域外と完全に遮蔽する．また，サーベイメーターにより室内空気，排気，排水の監視を行う．モニタリングには管理区域内で行う施設内モニタリングと事業所内居住区域で行う施設外モニタリングがある．

○実験開始前，作業中，終了後に汚染検査を行う．

○除染しやすいように，ポリエチレンろ紙で実験台上やフード内面を被覆する．

○線源の移動には主任者の許可が必要である．

○管理区域から器具を持ち出したり管理区域から退出したりする場合は，汚染の有無を検査室で確認し，入退出を記録する．

○床，使用した実験台などは，サーベイメーターか，あるいはスミヤろ紙で拭き取ってシンチレーションカウンターで汚染を確認する．

○使用しない線源は速やかに貯蔵室に保管する．

○廃棄物は分別隔離する．不燃物，非圧縮性不燃物，無機液体，難燃物，動物，可燃物に分け，所定の容器に捨て，速やかに分類別に密閉して廃棄物保管庫へ収納する．

■ 作業管理 ■

○「放射線防護の3原則」(p.48 参照) を守って作業する．

○教育訓練を必ず受ける．従事者は事前に，人体に対する影響，RI や発生装置の安全な取り扱い，放射線障害の防止に関する法令，放射線障害予防規定に関しての教育を受けることが義務づけられている (p. 49 図 4-4)．

○放射性物質を取り扱う場合には，手足や衣服の汚染をハンド・フット・クロスモニターで検査し，フィルムバッジおよびポケット線量計などで個人被曝量を測定・管理する．

○作業は単独ではなく，災害時の対処のために，複数人で行うことが望ましい．

■ 健康管理 ■

○初めて管理区域に立ち入る前に健康診断を受診する．

○一般健康診断以外に，血液，皮膚，目の検査を含む医学的サーベイランス (6ヵ月または1年を超えない期間ごと) が必要である (電離則，障害防止法で規定されている．電離則と防止法で多少の違いがあるが厳しいほうに合わせて実施するのが望ましい．表 4-2)．

○体内汚染のおそれがある場合は，体内汚染検査を受ける．

■ 緊急時の対応 ■

○大きな汚染が起きた場合には，ただちに実験を中止して汚染検査をする．

○パニックに陥ることなく，ただちに放射線管理者，取扱主任者に連絡する．

○内部にいる者に避難警告をする．

○RI による障害を受けた者，またはそのおそれがある者を速やかに救出，避難させる．

○火災が発生した場合は，消火活動を行って類炎を防ぐとともに，消防署に速やかに連絡する．

閲覧情報：化学同人　新人研究者・技術者のための安全のてびき　ISBN978-4-7598-1435-4

表 4-2　放射線に関する法規

文部科学省	**「放射線障害防止法（障防法）による安全規則」** <目的> 放射性同位元素，放射線発生装置の使用や放射性同位元素によって汚染されたものの取り扱いを規制することによって，放射線障害を防止し，公共の安全を確保する． <内容概略> ①使用の許可，届出の制度 ②放射線施設に対する基準（一般施設，貯蔵施設，廃棄設備を備えたもので，国の許可が必要．設置後も施設への監査がある） ③安全管理に関する業務　「人」（教育訓練，健康診断，被曝線量の測定…上限が決められている）；「場所」（管理区域，放射線の量および汚染状況の測定）；「行為」（使用，保管，廃棄，運搬，記録と記帳およびその保管） ④自主的管理（監督者：有資格の放射線取扱主任者…科学技術庁長官に届出，事業所ごとに内部規定「放射線予防規程」の制定） ⑤事故時，危険時の措置 ※詳細は文科省の HP 参照．http://www.mext.go.jp/a_menu/anzenkakuho/boushihou/index.html
厚生労働省	**「労働安全衛生法」** 労働安全衛生一般に関する法律のなかで「放射線業務」が規定されおり，その施行のため電離則が定められている．詳細は下記の電離則に述べられている．
	「電離放射線障害防止規則（電離則）」 http://law.e-gov.go.jp/htmldata/S47/S47F04101000041.html
	「労働基準法」 18 才未満や心身障害者は従事できない．また，妊娠，妊娠の可能性がある女性も従事できない．

放射線を取り扱う組織や取り扱い方法により，関係官庁，法令，その組み立て方も異なる（例：放射線同位元素の輸送→国土交通省，医療での使用→文科省，厚労省）．それぞれの法令，規則には重複部分があるが，異なる部分もある，障防法は公共の安全確保が目的であるが，電離則は事業者，従事者のみを対象としている．必要に応じて関連法規に精通することが大切である．

「放射線取扱主任者」

RI の使用，販売，賃貸，廃棄を行う場合は，放射線障害の防止についての監督を行うための放射線取扱主任者を選任しなければならない．第一種，二種，三種があり，第一，二種は主任者試験に合格し，講習終了後，免状が与えられる．第一種主任者は選任の区分が広い．

Compass

- ◆ **放射線源は外部と完全に遮断し，除染の準備をして作業しよう．**
- ◆ **作業者は事前の教育訓練を受け，作業は一人ではなく複数で行おう．**
- ◆ **管理区域からの入退出時は汚染の有無を検査し，記録しよう．**

閲欄情報：化学同人　新人研究者・技術者のための安全のてびき　ISBN978-4-7598-1435-4

被曝の防止

■ 被曝について ■

生体（人体）が放射線を受けた場合の影響は，受けた放射線の種類（α線，γ線など）により異なるため，それぞれの組織・臓器の平均吸収線量〔単位はGy（グレイ）〕に放射線の種類ごとに定められた放射線荷重係数 w_R（放射線種によって値が異なる，表4-3)を乗じて線量当量〔等価線量 H_T，単位はSv(シーベルト)〕を算出する(表4-4).

$$H_T\ (\mathrm{Sv}) = w_R \times \mathrm{Gy}$$

また，同じ放射線を受けても，組織・臓器により放射線に対する感受性が異なる．各組織・臓器の発がん性，遺伝的影響の感受性に応じて重み係数(組織荷重係数，w_T，表4-5) が定められており，実効線量（H_E，単位はSv）が求められる．

$$H_E = \Sigma\, w_T \times H_T$$

発がんおよび遺伝的影響が大きいのは生殖腺であり，小さいのは皮膚，骨表面である．新生能力の大きい細胞，分裂時間が長い細胞，分化程度の低い細胞ほど放射線感受性が高いといわれている．

■ 外部被曝と内部被曝 ■

被曝は人体表面からの外部被曝と，放射性物質が呼吸器，口，皮膚などから体内に取り込まれて人体内部が被曝する内部被曝に分類される．

◆外部被曝防護の3原則（詳細はp.56参照）

①距離による防護
②時間による防護
③隠蔽による防護

◆内部被曝防護――体内汚染の防止

①経口摂取：喫煙や飲食および化粧等の禁止，手袋，オートピペッタ，防じんマスクの使用．
②経気道摂取：フードやグローブボックス内で作業する．ガス化しやすい核種，化合物を扱う場合はチャコールマスクを使用する．
③経皮摂取：防御着や手袋を着用し，皮膚の露出部を最小限にする．さらに，帽子，安全メガネおよびゴーグルなどを利用する．

■ 放射線障害 ■

生体が放射線を被曝した場合には，次のような放射線障害を起こす．放射線障害は確定的影響と確率的影響に分けられる（①②)．また，障害発生時期により分類すると③④⑤に分けられる．

①確定的影響：しきい線量（影響が発生する最低線量）が存在する．被曝線量の増加とともに症状が重篤になる．白血球の減少など．
②確率的影響：しきい線量が存在せず，被曝線量の増加とともに，障害の発生確率が増加する影響．発がん，遺伝子障害など．
③急性影響：比較的短期間（数日から数週間で発症）に障害が発生する．食欲不振，吐き気などに始まる消化器障害，脱力感，中枢神経系障害，放射線熱傷など．
④晩発生影響：長い期間（数ヵ月以上）を経て発生する．がん，脱毛，白血球減少，白内障など．
⑤遺伝的影響（生殖細胞への影響）：子孫に奇形，発達障害や先天的疾患が生じる．

労働安全の観点から目，皮膚などの身体部位や女子腹部などには被曝量の制限がある．詳細は放射線障害防止法など関連法規を参照のこと．

閲覧情報：化学同人　新人研究者・技術者のための安全のてびき　ISBN978-4-7598-1435-4

表4－3　放射線種による放射線荷重係数の違い

放射線種	放射線荷重係数（w_R）
X線・γ線・β線	1
陽子線	5
α線	20
中性子線	5～20

表4－4　人体に対する放射線の影響（被曝）

実効線量〔ミリシーベルト(mSv)〕	内訳
1～0.3	胸部X線撮影
2.4	1年間に自然環境から人が受ける放射線の世界平均
50	放射線業務につく人（放射線業務従事者）が1年間にさらされてもよい放射線の限度
50	白血球の減少（一度にまとめて受けた場合．以下同じ）
1000	急性放射線障害．悪心，嘔吐，水晶体混濁
2000	出血，脱毛など．5%の人が死亡する

高度12,000 mの飛行機内では5 μSv/時間の放射線を受ける．

表4－5　組織荷重係数

組織・臓器	組織荷重係数（w_T）
生殖腺	0.20
赤色骨髄，結腸，肺，胃	0.12
膀胱，乳腺，肝臓，食道，甲状腺	0.05
皮膚，骨表面	0.01
残りの組織・臓器	0.05

各組織・臓器の荷重係数の総和は1

Compass

- ◆ 放射線による影響は，放射線種や組織・臓器により違うことを知っておこう．
- ◆ 人体への被曝には外部被曝と内部被曝があることを覚えておこう．
- ◆ 放射線障害には，急性や晩発生や遺伝的なものがあるので注意しよう．

閲覧情報：化学同人　新人研究者・技術者のための安全のてびき　ISBN978-4-7598-1435-4